

Miguel Eduardo Del Aguila
Montalvo

**Escoamento de Emulsões Óleo
em Água através de Micro-
capilares**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA**
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro
Agosto de 2008



Miguel Eduardo Del Aguila Montalvo

**Escoamento de Emulsões Óleo em Água através de
Micro-capilares**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho
Co-Orientador: Prof. Vladimir Alvarado Basante

Rio de Janeiro
Agosto de 2008



Miguel Eduardo Del Aguila Montalvo

**Escoamento de Emulsões Óleo em
Água através de Micro-capilares**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Vladimir Alvarado Basante

Co – Orientador

Department of Chemical and Petroleum Engineering –
University of Wyoming

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Antonio Luiz Serra de Souza

CENPES – PETROBRAS

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico–PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de agosto de 2008.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Miguel Eduardo Del Aguila Montalvo

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Nacional de Trujillo - UNT (Trujillo, Perú) em 2003.

Ficha Catalográfica

Del Aguila Montalvo, Miguel Eduardo

Escoamento de emulsões óleo em água através de micro-capilares / Miguel Eduardo Del Aguila Montalvo ; orientador: Márcio da Silveira Carvalho ; co-orientador: Vladimir Alvarado Basante. – 2008.

82 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Emulsões. 3. Recuperação avançada de petróleo. 4. Micro-capilares. 5. Meios porosos. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Basante, Vladimir Alvarado. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para meus pais, Olga e Miguel.

Agradecimentos

Quero agradecer

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pela oportunidade de realizar este trabalho, por se constituir na minha casa de estudos e valorizar minha formação profissional.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

À PETROBRAS, pelo apoio concedido no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu orientador, Professor Márcio da Silveira Carvalho, pela confiança, apoio constante e direcionamento durante a realização deste trabalho.

À minha família, pela formação, carinho e por ser meu suporte desde sempre.

A Sofia, pelo incondicional apoio, imprescindível para terminar este projeto.

Aos profissionais do Laboratório de Termociências, em especial aos amigos do grupo de trabalho do Professor Marcio Carvalho e Professor Paulo Roberto, pela amizade e ajuda que sempre me dedicaram.

Aos meus colegas da PUC, pela amizade, apoio e por fazerem da minha permanência no Brasil, uma experiência enriquecedora.

À Banca Examinadora, pelas observações contribuídas ao presente trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos e ajuda.

Resumo

Del Aguila Montalvo, Miguel Eduardo; Carvalho, Márcio. **Escoamento de Emulsões Óleo em Água através de Micro-capilares**. Rio de Janeiro, 2008, 82p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Evidências experimentais demonstram o potencial da injeção de emulsões no aumento do fator de recuperação de óleo. O mecanismo responsável por esta melhor varredura do reservatório é a redução da mobilidade da água em regiões do reservatório já varridas por água. Esta redução pode ser associada ao bloqueio parcial de gargantas do meio poroso por gotas da fase dispersa da emulsão. A eficiência deste bloqueio parcial depende fortemente da geometria do poro, das características morfológicas e propriedades físicas da emulsão injetada. A utilização eficiente deste método de recuperação é limitada pela falta de entendimento fundamental de como emulsões escoam através de um meio poroso. Este trabalho tem como objetivo estudar o escoamento de emulsões através de gargantas de poros, que são modeladas fisicamente por micro-capilares com garganta nos experimentos desenvolvidos nesta pesquisa. Os resultados mostram como a permeabilidade varia com as propriedades e características morfológicas da emulsão e parâmetros geométricos do micro-capilar. Estes dados definem as propriedades necessárias de emulsões em função das características do reservatório para a obtenção do efeito de bloqueio parcial desejado e servem de entrada de dados para modelo de rede de capilares de escoamento de emulsões em meios porosos.

Palavras-chave

Emulsões; recuperação avançada de petróleo; micro-capilares; meios porosos.

Abstract

Del Aguila Montalvo, Miguel Eduardo; Carvalho, Márcio. **Oil Water Emulsions Flow through Micro-capillaries**. Rio de Janeiro, 2008, 82p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Experimental evidences show the potential of emulsion injection in the improvement of oil recovery factor. The responsible mechanism for this better reservoir sweep is the water mobility reduction in regions already swept by water. This reduction can be associated with partial blockage of porous media throats by droplets of emulsion dispersed phase. The efficiency of this partial blockade strongly depends on pore geometry, morphological characteristics and physical properties of the injected emulsion. The efficient use of this recovery method is limited by the lack of fundamental understanding of how emulsions flow through a porous medium. This work aims to study the flow of emulsions through pores throats, which are physically modeled by constricted micro-capillaries in the experiments presented here. The results show how permeability varies with geometrical parameters of micro-capillaries, emulsion properties and morphological characteristics. These data define the necessary properties of emulsions according to the reservoir characteristics to obtain the desired blocking effect and serve as input data to capillaries network model of flow of emulsions in porous media.

Keywords

Emulsions; enhanced oil recovery; micro-capillaries; porous media.

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Motivação	20
1.2. Objetivos	23
1.3. Escopo	24
2. Conceitos fundamentais	25
2.1. Emulsões	25
2.1.1. Tipo de emulsões	25
2.1.2. Fluxo de emulsões óleo em água em meios porosos	27
2.1.3. Emulsões em processos de recuperação avançada de petróleo	28
2.2. Reologia das emulsões	29
2.3. Floculação e Coalescência	30
2.4. Elementos de atividade superficial	31
2.4.1. Importância da superfície	31
2.4.2. Tensão superficial e tensão interfacial	32
2.4.3. Surfactante	33
2.5. Influência da distribuição de tamanho de gota nas emulsões	35
2.6. Molhabilidade	37
2.7. Revisão bibliográfica	38
3. Abordagem experimental	40
3.1. Emulsões	40
3.1.1. Formulação de emulsões	40
3.1.2. Preparação das emulsões	44
3.1.3. Distribuição de tamanho de gota das emulsões	49
3.1.4. Caracterização reológica das emulsões	52
3.2. Bancada experimental	56
3.2.1. Sistema de injeção de fluidos	57
3.2.2. Sistema de medição de diferença de pressão	58

3.2.3. Sistema de visualização do escoamento através dos capilares	60
3.3. Escoamento de emulsões através de micro-capilares	61
3.4. Dificuldades encontradas no processo experimental	62
4. Resultados e discussões	64
4.1. Efeito da concentração de óleo nas emulsões	68
4.2. Efeito do tamanho de gota	70
4.3. Efeito da geometria do capilar	74
5. Conclusões	78
6. Referências bibliográficas	80

Lista de figuras

Figura 1.1. Injeção de polímeros	19
Figura 1.2. Óleo produzido, reservas provadas, e óleo objetivo para métodos de recuperação avançada nos Estados Unidos no fim de 1993	20
Figura 1.3. Consumo de energia por tipo de combustível, 1980 - 2030 (quadriilhão BTU)	21
Figura 1.4. Cenários de previsão da produção mundial de petróleo em bilhões de barris/ano	22
Figura 2.1. Emulsão - Mecanismo de bloqueio	27
Figura 2.2. Tipos de escoamento exibidos por fluidos: Newtonianos, plásticos, pseudoplásticos e dilatantes	30
Figura 2.3. Efeito do tamanho de partículas sobre a superfície	31
Figura 2.4. (A) Esquema simplificado de uma molécula ativa de superfície. (B) Estrutura molecular do surfactante dodecil sulfato de sódio ($C_{12}H_{25}SO_4^-Na^+$)	33
Figura 2.5. Formação de micelas	34
Figura 2.6. Dependência das propriedades do surfactante Lauril Sulfato de Sódio respeito à Concentração Micelar Crítica (CMC)	35
Figura 2.7. Viscosidade como função da taxa de cisalhamento. Distribuições de tamanho de partículas correspondentes às emulsões mostradas	36
Figura 2.8. Molhabilidade de rochas sedimentares. Interface líquido-líquido e sólido-líquido	37
Figura 3.1. Picnômetro e balança utilizada na determinação de densidade de fluidos	43
Figura 3.2. Fotografias da medição de tensão superficial em (a) fase contínua (b) óleo EMCAplus 350 (c) óleo Tivela S 460	43

Figura 3.3. Tensiômetro Lauda VO 2001	44
Figura 3.4. (a) Agitador magnético. (b) Fase contínua utilizada nas emulsões	45
Figura 3.5. Óleo filtrado	45
Figura 3.6. (a) Ultra Turrax T-25 (b) Dispensor rotor-estator	46
Figura 3.7. Distribuição de tamanho de gota segundo velocidade de mistura (N)	47
Figura 3.8. Distribuição de tamanho de gota segundo tempo de mistura (T)	47
Figura 3.9. Processo de mistura (50/50)% na obtenção de emulsões de gotas grandes	48
Figura 3.10. Mastersizer 2000	49
Figura 3.11. (a) Hydro 2000MU (b) Sistema Mastersizer 2000	49
Figura 3.12. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 3	50
Figura 3.13. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 4	50
Figura 3.14. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 8	50
Figura 3.15. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 11	50
Figura 3.16. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 1	51
Figura 3.17. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 5	51
Figura 3.18. Distribuição de tamanho de gota – Emulsão 10	51
Figura 3.19. Variação da distribuição de tamanho de gota da emulsão 1	52
Figura 3.20. Reômetro Physica MCR301	53
Figura 3.21. Geometria Couette	53
Figura 3.22. Viscosidade em função da taxa de cisalhamento, emulsões 1, 5 e 10	53
Figura 3.23. Viscosidade em função da taxa de cisalhamento, emulsões 3,4,8 e 11	54
Figura 3.24. Esquema da bancada experimental	56
Figura 3.25. Bancada experimental	57
Figura 3.26. Bomba de seringa e seringa utilizada na injeção de emulsões	57
Figura 3.27. (a)Capilar 200/50 (b) capilar 100/50 (c) capilar 200/20	58

Figura 3.28. Transdutor de pressão VALIDYNE DP15TL	58
Figura 3.29. Placa de terminais VALIDYNE P/N 12871-1	59
Figura 3.30. (a) Cabo P/N 12870-5, (b) Placa de interface VALIDYNE UPC2100	59
Figura 3.31. Microscópio Carl Zeiss Axiovert 40 MAT	60
Figura 3.32. Detalhe de conexões do sistema de injeção de fluidos e piscina de glicerina	61
Figura 4.1. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 100/50	65
Figura 4.2. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/50	65
Figura 4.3. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20	66
Figura 4.4. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20	66
Figura 4.5. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20	68
Figura 4.6. Mobilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20	69
Figura 4.7. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20	69
Figura 4.8. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/50	70
Figura 4.9. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/50	71
Figura 4.10. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 100/50	71
Figura 4.11. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 100/50	72
Figura 4.12. Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20	72

Figura 4.13. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20	72
Figura 4.14. Diferença de pressão em função da vazão no Capilar 200/20	73
Figura 4.15. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20	73
Figura 4.16. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/50	74
Figura 4.17. Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20	75
Figura 4.18. Mobilidade em função do número de capilaridade	76

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Macro-emulsões versus micro-emulsões	26
Tabela 2.2. Superfície total versus tamanho de partícula.	32
Tabela 3.1. Fatores considerados na formulação de emulsões	41
Tabela 3.2. Concentrações volumétricas das fases nas emulsões.	42
Tabela 3.3. Características de preparação das emulsões de gotas pequenas.	47
Tabela 3.4. Características de preparação das emulsões de gotas grandes.	48
Tabela 3.5. Características morfológicas das emulsões.	52
Tabela 3.6. Valores de taxa de cisalhamento gerados na injeção de emulsões em capilares com garganta.	55
Tabela 3.7. Viscosidades das emulsões injetadas nos capilares com garganta.	55
Tabela 4.1. Experiências realizadas de escoamento de emulsões através de micro-capilares.	64